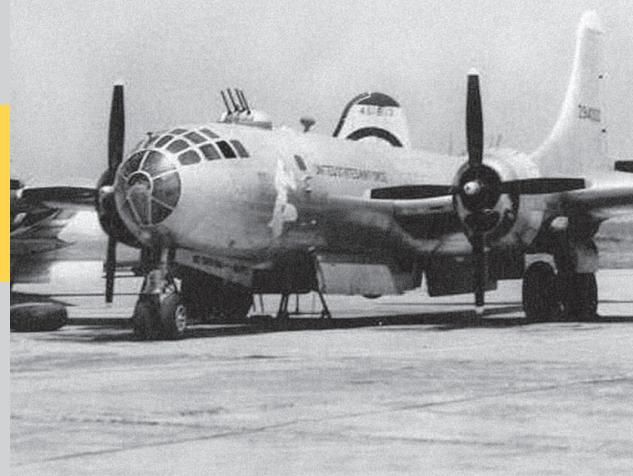




АЛЕКСАНДР МИКЕРОВ,

д. т. н., проф. каф.
систем автоматического управления
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
a.mikerov@gmail.com

Электроприводы с регулируемой скоростью были созданы еще в доэлектронную эру после изобретения системы Вард-Леонарда и ее совершенствования с помощью электромашинных усилителей.



НА ЗАРЕ МЕХАТРОНИКИ: ПЕРВЫЕ РЕГУЛИРУЕМЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ

РИС. 1. ►
Вернер фон Сименс
(1816–1892)



Не прибегая к строгим определениям, можно сказать, что мехатроника — это наука об электронном управлении механическим движением с помощью пневматических, гидравлических или электрических двигателей [1], последние из которых мы и будем обсуждать в этой статье.

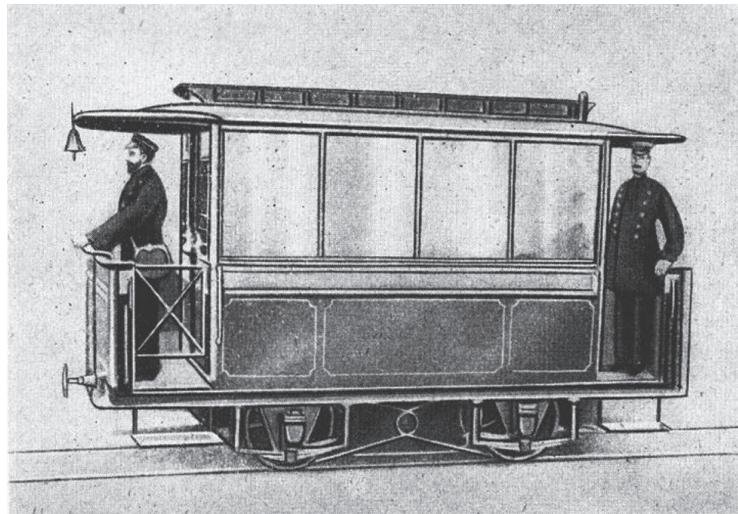
Первый практически полезный коллекторный электродвигатель постоянного тока был создан российским ученым Борисом Семеновичем Якоби в 1834 г. и усовершенствован немецким инженером Фридрихом

фон Хефнер-Альтенеком (Friedrich von Hefner-Alteneck) в 1872 г. [2]. Однако широкому применению такого электродвигателя мы обязаны знаменитому немецкому изобретателю и промышленнику Вернеру фон Сименсу (Werner von Siemens) (рис. 1), запустившему в Берлине в 1882 г. первое общественное транспортное средство с электротягой — трамвай, хотя ранее экспериментальная установка подобного типа испытывалась под Петербургом еще в 1875 г. российским изобретателем Фёдором Аполлоновичем Пироцким [3, 4].

Трамвай Сименса (рис. 2) питался от генератора постоянного тока по трем рельсам, что было впоследствии заменено знакомым нам бугельным подвесом или пантографом [4]. Этот тяговый электропривод (рис. 3) содержит электродвигатель постоянного тока с обмоткой якоря (1) на роторе, щеточно-коллекторный узел (2) и последовательно включенную обмотку возбуждения (3) на статоре, соединенные с источником питания через защитное токовое реле (4) и контроллер (5) с секциями сопротивлений, коммутируемых кондуктором трамвая для изменения скорости движения.

При таком включении момент или тяга, развиваемые двигателем, пропорциональны току якоря. Пуск

РИС. 2. ►
Трамвай Сименса



и разгон трамвая осуществлялся с максимальным моментом при нулевом сопротивлении контроллера (5), а затем скорость снижалась ступенчато за счет введения сопротивления секций. Очевидным недостатком такого электропривода, помимо невозможности плавного регулирования скорости, была значительная потеря электроэнергии при уменьшении скорости путем введения сопротивления контроллера.

В 1888 г. Никола Тесла (Nikola Tesla) изобрел синхронный и асинхронный электродвигатели переменного тока без щеточно-коллекторного узла, однако эффективные методы их регулирования не были предложены за следующие несколько десятилетий. Впервые проблема регулирования скорости была решена в многомашинном электроприводе Вард-Леонарда, запатентованном в 1891 г. сотрудником компании Эдисона Гарри Вард-Леонардом (Harry Ward Leonard) (рис. 4) [5, 6].

Он родился в многодетной американской семье в столице штата Огайо. Его мать носила фамилию Вард, а отец — Леонард. В 1883 г. Гарри Вард-Леонард окончил престижный Массачусетский технологический институт и был сразу принят в компанию Эдисона, где быстро вырос до управляющего всеми операциями компании в США и Канаде. В 1898 г. он основал собственную компанию Ward Leonard Electric, которая существует до сих пор и поставляет регулируемые электроприводы в основном для военно-морского флота [5]. Вард-Леонард получил более ста патентов и был вице-президентом и активным членом Американского института инженеров-электриков (AIEE) вплоть до своей преждевременной кончины.

Электропривод (называемый также системой) Вард-Леонарда, предназначенный для применения в трамвайном вагоне с питанием от сети постоянного тока, показан на рис. 5 [6].

Он содержит три электрические машины постоянного тока. Тяговый двигатель ТД связан с колесом трамвая (1) ременной передачей и питается от генератора ЭГ, установленного на валу вспомогательного приводного двигателя ПД постоянной скорости, который, в свою очередь, питается через токоприемник ТП от воздушного контактного провода П и рельса Р. Ток вспомогательного двигателя

ПД контролируется амперметром А. Обмотки возбуждения двигателей ВТ и ВП подключены прямо к питающей сети, а обмотка возбуждения генератора ВГ — через контроллер К, управляемый кондуктором. При постоянной скорости вспомогательного двигателя ПД напряжение, вырабатываемое генератором ЭГ, пропорционально напряжению на его обмотке возбуждения ВГ, поэтому и скорость движения трамвая будет также прямо пропорциональна этому напряжению. При питании от сети переменного тока вспомогательный электродвигатель ПД может быть синхронным или, что бывает чаще, асинхронным. Может также использоваться любой другой двигатель, например бензиновый. Однако и в том и в другом случае потребуется еще один, дополнительный генератор постоянного тока (возбудитель) для питания обмоток возбуждения основного генератора и приводного электродвигателя.

Еще до конца XIX в. системы Вард-Леонарда стали применяться для привода орудийных башен военно-морского флота США, шахтных подъемников, пассажирских лифтов, движущихся тротуаров (использовавшихся на Всемирной выставке в Париже в 1900 г.), а также управления локомотивами во время Первой мировой войны [5]. Очевидный недостаток системы Вард-Леонарда — многомашинность — искупалась уникальной линейностью характеристик, диапазоном регулирования, простотой реверсирования скорости, а также возможностью торможения при закорачивании якоря генератора на тормозной реостат. Кроме того, в режиме торможения был возможен возврат энергии от генератора в сеть (рекуперация). Все это объясняет широкое применение таких приводов средней и высокой мощности вплоть до 1960-х гг., когда их вытеснили приводы с ртутными выпрямителями и тиристорами.

Второе дыхание системы Вард-Леонарда обрели в 1930-х гг. после изобретения электромашинных усилителей (ЭМУ), предназначенных для плавного регулирования скорости электродвигателя. Конечно, питание двигателя постоянного тока от генератора теоретически могло обеспечить любую плавность и диапазон регулирования скорости двигателя, однако при большой мощности двигателя

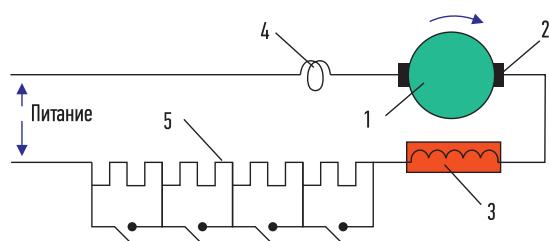


РИС. 3. ▲
Тяговый электропривод

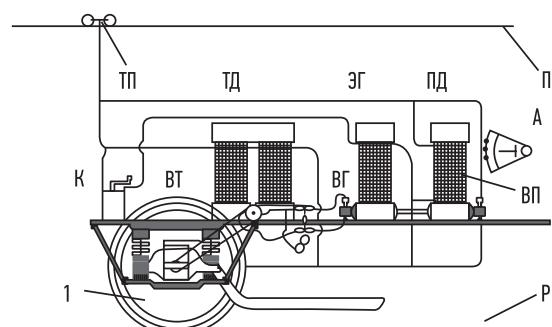
контроллер может быть только ступенчатым. Рассмотрим для примера трамвайный двигатель мощностью 75 кВт с КПД 75%, для которого потребуется генератор с выходной мощностью в 100 кВт. Для обычного генератора постоянного тока коэффициент усиления по мощности, т. е. отношение выходной мощности к входной на обмотке возбуждения, не превышает 100. Соответственно, в нашем случае контроллер напряжения возбуждения должен регулировать 1 кВт и его трудно сделать плавным без электроники.

Поскольку электронных усилителей подобной мощности тогда еще не существовало, проблема была



РИС. 4. ▲
Гарри Вард-Леонард
(1861–1915)

РИС. 5. ▼
Электропривод
Вард-Леонарда



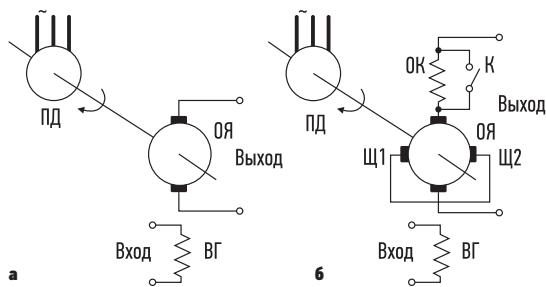


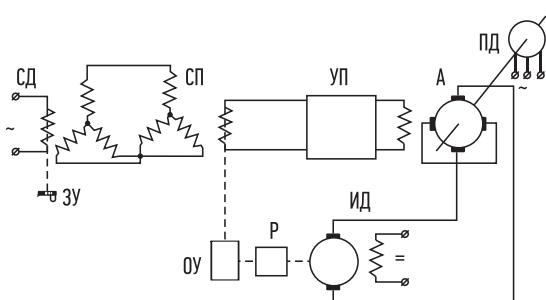
РИС. 6. ▲
а) Генератор
постоянного тока; б) ЭМУ

решена созданием ЭМУ в виде метадина и амплидина, увеличивших коэффициент усиления генератора по мощности в сто раз (до 10 000) [7, 8]. Метадин был разработан в конце 1920-х гг. известным итальянским ученым и инженером Джузеппе Пестарини (Giuseppe Pestarini), выпускнику Высшей электротехнической школы Франции, проектировавшим тяговые двигатели для локомотивов и подъемных кранов в парижском отделении американской компании Thomson-Houston, а позже ставшим профессором ряда итальянских и американских университетов [9].

На рис. 6 показана схема обычного генератора постоянного тока (рис. 6а) и ЭМУ (рис. 6б), содержащих приводной электродвигатель постоянной скорости ПД и генератор с обмоткой якоря ОЯ и входной обмоткой возбуждения ВГ.

Выход каждой схемы подключается к исполнительному электродвигателю, момент или скорость которого необходимо регулировать. В обычном генераторе (рис. 6а) выходное напряжение пропорционально входному. ЭМУ отличается наличием дополнительных короткозамкнутых щеток (Щ1 и Щ2), расположенных перпендикулярно основным щеткам, и компенсационной обмоткой ОК. Для метадина компенсационная обмотка отсутствует (ключ К закорочен). При этом метадин имеет

РИС. 7. ▼
Следящая система
с амплидином



свойства генератора тока, что обеспечивает регулирование момента электродвигателя постоянного тока (т. е. его тяги). Это как раз необходимо для тяговых электродвигателей. Именно поэтому метадины начали использовать во время Второй мировой войны прежде всего для локомотивов железных дорог и метро, а также для управления корабельными орудийными башнями.

Компенсационная обмотка ОК была предложена в середине 1930-х гг. знаменитым американским ученым и изобретателем шведского происхождения Эрнестом Александерсоном (Ernst Alexanderson), получившим образование в Королевском технологическом институте в Стокгольме и Берлинском техническом университете [8, 10]. В 1901 г. он эмигрировал в США и работал до конца жизни в компании General Electric, где создал, в частности, электромашинный радиогенератор, магнитный усилитель и различные телевизионные системы.

ЭМУ с разомкнутым ключом К (рис. 6б) был назван амплидином [8]. Его основное отличие от метадина состоит в том, что он является генератором не тока, а напряжения для исполнительного двигателя, что и позволяло прекрасно регулировать его скорость. Поэтому при мощности на валу до 10 кВт и коэффициенте усиления в 10 000 входная мощность амплидина не превышала 2 Вт, что было вполне достижимо для усилителей на электронных лампах следящих систем. На рис. 7 приведена типичная схема сельсинной следящей системы с амплидином А, содержащей приводной двигатель переменного тока ПД, который управляет исполнительным двигателем ИД независимого возбуждения, поворачивающим через механический редуктор Р объект управления ОУ. ОУ связан с ротором сельсина-приемника СП дистанционной передачи, сельсин-датчик СД которого поворачивается ручкой задающего устройства ЗУ [7]. Ротор сельсина-приемника СП вырабатывает сигнал рассогласования, управляющий через ламповый усилитель-преобразователь УП амплидином А через его обмотку возбуждения. Таким образом, здесь, как и в обычной следящей системе, скорость исполнительного двигателя пропорциональна сигналу рассогласования.

Амплидины были впервые использованы в США для систем наведения корабельных артиллерийских установок по азимуту и углу места, в одном из первых радиолокаторов противовоздушной обороны SCR-584, созданном в 1942 г., в сталепрокатном оборудовании и системе управления стержнями в ядерных установках [8, 11].

Амплидина был также оснащен дальний четырехвинтовой бомбардировщик B-29 (Супер-крепость, показан на заставке к статье), который считался самым продвинутым и автоматизированным бомбардировщиком Второй мировой войны и был оборудован 150 электродвигателями, в том числе в составе радиолокационного оборудования и сельсинных следящих систем, для дистанционного управления пятью пулеметными турелями с использованием аналогового вычислителя [12, 13]. В частности, в 1945 г. по приказу президента Трумэна эти самолеты выполнили атомную бомбардировку японских городов Хиросима и Нагасаки. В СССР Сталин, создавая собственную атомную бомбу, тоже озабочился средствами ее доставки. Самолеты B-29 по ленд-лизу не передавались, однако во время советско-японской войны четыре B-29 совершили аварийную посадку на советском Дальнем Востоке, были перегнаны в Москву, разобраны, тщательно изучены и скопированы [13]. Сталин приказал в точности воспроизвести подобный шедевр со всем его оборудованием, что и было воспринято в буквальном смысле. Самолет, названный ТУ-4, спроектированный в КБ Туполева и выпущенный в 1948 г., повторял все, включая такие нюансы внутреннего интерьера B-29, как пепельницы и подстаканники [13]. В ОТК заводов при приемке каждой детали и узла тщательно проверялся их вес, указанный в чертежах. Наряду с другим оборудованием было начато и серийное производство амплидинов, нашедших широкое применение, например в советских самолетных радиолокационных станциях.

Однако век амплидинов был недолг в связи с переходом в начале 1960-х гг. к транзисторным электроприводам малой мощности с порошковыми муфтами и двухфазными двигателями. Значительно сложнее обстояло дело с электроприводом большей мощности. Аналогично предыдущему примеру, даже для двигателя средней

мощности в 7,5 кВт при том же КПД 75% потребуется электронный усилитель с выходной мощностью 10 кВт, которая при напряжении 200 В достигается при токе в 50 А. Подобные токи смогли обеспечить только тиатраны в 1970-х гг. и тиристоры в 1980-х гг. Впрочем, некоторые системы Вард-Леонарда используются до сих пор. ◆

ЛИТЕРАТУРА

1. Tutunj T. A. Mechatronic Systems: Overview. 2013. www.philadelphia.edu.jo/academics/tutunj/uploads/Mx%20Overview.pdf
2. Early motors / Electric motor. https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_motor#Early_motors
3. Микров А. Г. Вернер Сименс — основатель европейской электронной промышленности // Control Engineering Россия. 2016/ № 6 (66).
4. History of trams. https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_trams
5. Learn how Ward Leonard helped shape the industry. www.wardleonard.com/about-ward-leonard/history/
6. Ward-Leonard H. Electrical Transmission of Power. Patent US4/63802. 24.11.1891.
7. Радин В. И. Электромашинные усилители. М.-Л.: Госэнергоиздат. 1962.
8. Amplidyne. www.radartutorial.eu/17.bauteile/bt18.en.html
9. Pestarini Giuseppe Massimo. www.treccani.it/enciclopedia/giuseppe-massimo-pestarini_%28Dizionario-Biografico%29

- Первый электропривод со ступенчатым регулированием тяги, т. е. момента на валу электродвигателя, был создан Сименсом в 1882 г. для трамвая.
 - Разработка электропривода с плавным регулированием скорости электродвигателя стала возможной только после изобретения в 1891 г. Вард-Леонардом системы с питанием электродвигателя от дополнительного генератора.
 - Изобретение в 1930-х гг. ЭМУ (метадина и амплидина) позволило стократно снизить входную мощность управления электроприводом — до уровня ламповых электронных усилителей.
 - Метадин, изобретенный Пестарини, обеспечивал плавное регулирование тяги электропривода, а амплидин, созданный Александерсоном, — его скорости.
 - Успешное применение ЭМУ в системах вооружения Второй мировой войны способствовало освоению отечественной промышленностью высококачественных следящих систем вплоть до появления тиристорных и транзисторных систем управления.
-
10. Микров А. Г. Магнитные усилители — между лампами и транзисторами // Control Engineering Россия. 2020. № 4(88).
 11. Automatic Control Equipment Chapter 10 Part D: Amplidyne follow-system. www.eugeneleeslover.com/USNAVY/CHAPTER-10-D.html
 12. Boeing B-29 Superfortress "Enola Gay". www.sil.si.edu/object/boeing-b-29-superfortress-enola-gay/nasm_A19500100000
 13. Полунин С. В. Первый советский стратегический бомбардировщик Ту-4: история, описание и характеристики. www.militaryarms.ru/voennaya-tekhnika/aviaciya/tu-4/